

全域连通的双频链路无人机群快速应急组网方法

胡文信¹, 孙彦景², 王博文^{1,3}, 徐鹏⁴, 仇鼎¹, 李庚¹

(1. 中国矿业大学信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 中国矿业大学计算机科学与技术学院, 江苏 徐州 221008;
3. 中国矿业大学物联网(感知矿山)研究中心, 江苏 徐州 221008; 4. 江苏自动化研究所, 江苏 连云港 222061)

摘要: 为解决应急场景下拓扑快变、资源受限的无人机自组网在全域连通与长短包差异化传输上的难题, 基于软件定义网络控分分离思想, 提出全域连通的双频链路无人机群快速应急组网方法。该方法将短包控制信息与长包业务数据的传输分别映射至双频网络的控制平面与数据平面: 针对控制平面, 设计基于序数势博弈的功率等级梯度改进算法以分布式实现网络全域联通; 针对数据平面, 依据功率余量采用联盟图博弈构建面向业务集群的低时延网络以优化业务数据传输性能。仿真结果表明, 所提方法在快速实现控制平面全域连通的同时, 有效降低了数据平面的业务集群平均路径时延, 满足应急场景下无人机自组网的稳定性和实时性需求。

关键词: 无人机自组网; 双频链路; 序数势博弈; 联盟图博弈

中图分类号: TP393.1

文献标志码: A

DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2025211

Rapid emergency networking method for UAV swarms relying on dual-band links for global connectivity

HU Wenxin¹, SUN Yanjing², WANG Bowen^{1,3}, XU Peng⁴, ZHANG Ding¹, LI Geng¹

1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China
2. School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China
3. IoT Perception Mine Research Center, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China
4. Jiangsu Automation Research Institute, Lianyungang 222061, China

Abstract: To solve the problem of global connectivity and differentiated transmission of long and short packets in unmanned aerial vehicle (UAV) ad hoc networks with rapidly changing topology and limited resources in emergency scenarios, a rapid emergency networking method for UAV swarms relying on dual-band links for global connectivity was proposed based on the control-data separation concept of software defined networking. The method mapped the transmission of short-packet control information and long-packet service data to the control plane and data plane of the dual-band network respectively. For the control plane, a gradient-improvement algorithm based on ordinal potential game for power level was designed to achieve global network connectivity. For the data plane, a low-latency network for service clusters was built by using coalition graph games based on power margin in order to optimize service data transmission. Simulation results show that the proposed method achieves global connectivity of the control network with lower power while effectively reducing the average path delay of service clusters in the data plane. Thus, it meets the stability and real-time requirements of ad hoc networks for UAV in emergency scenarios.

Keywords: unmanned aerial vehicle ad hoc network, dual-band link, ordinal potential game, coalitional graph game

收稿日期: 2025-09-16; 修回日期: 2025-11-17

通信作者: 孙彦景, yjsun@cumt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.62571530); 船舶领域重大基金资助项目(No.CBG01N23-01-04); 深圳市科技计划基金资助项目(No.KCXFZ20240903094204007)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.62571530), Major Program in the Shipbuilding Field (No.CBG01N23-01-04), Shenzhen Science and Technology Program (No.KCXFZ20240903094204007)

0 引言

在自然灾害、事故救援、社会安全等公共安全应急突发事件处置过程中,通常面临公共通信网络设施损毁或破坏、灾情感知手段受限等严峻挑战,迫切需要增强全域通信覆盖和全方位感知的能力^[1]。无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)具有全地形可移动、全空间立体覆盖、模块化可编程性等独特优势,已成为低空应急救援的重要工具^[2],通过搭载通信和感知设备,可在不依赖基站等基础通信设施的情况下快速组建应急自组网,实时采集受灾区域态势数据,有效提高灾害场景信息感知的广度和精度,为应急救援决策提供精准可靠的数据支撑^[3]。

在无人机自组网中,无人机之间的信息交互主要包括控制信息与业务数据 2 种类型^[4]。控制信息包括无人机姿态控制指令、编队协同指令、链路状态监测、邻居节点发现、网络拓扑维护、时钟同步以及任务分配指令等短包数据,具有全网流通和高效性的特点。业务数据主要包括文本、音频、视频数据等场景感知的任务信息,多为需要高带宽的长包数据。当无人机群在应急场景中执行态势感知、搜寻救援等任务时,既要保持网络持续全域连通以实现控制信息的精准传递,又要在无人机业务集群内部高效传输业务数据,实现环境实时监测、高清视频回传和智能分析计算。因此,有必要对无人机群自组网的拓扑连通性和数据高效传输开展研究。

在拓扑连通性方面,文献[5]通过动态优化节点位置构建 MAX-Tree 型拓扑编队,在保证拓扑全域连通的情况下最大化网络覆盖。在应急场景中无人机需要遵循预设航线执行任务,主要通过调整发射功率的方式控制网络拓扑连通性。文献[6]根据网络节点间的动态空间相关性提出了基于博弈论的拓扑控制方法,通过平衡节点功耗最大化网络连接。文献[7]采用最优刚性图简化拓扑,通过优化拓扑连通性、覆盖质量、邻居干扰和剩余能量等跨层参数,动态调整节点发射功率以延长网络寿命。针对节点分布式部署场景,文献[8]提出了一种面向多智体系统的拓扑重构方法,根据局部子图观测和统一控制策略在线优化网络拓扑结构以满足动态复杂环境中的任务需求。文献[9]将混合可见光和射频通信的车载自组网拓扑控制问题建模为协调博

弈,通过局部功率来调整和迭代优化动态平衡网络的通信质量与能耗。

在数据高效传输方面,文献[10]以吞吐量和传输时延为约束条件,设计了一种基于 Warshall 和粒子群优化的网络拓扑构建方法以最大化拓扑持续时间,有效保障了业务数据传输的连续性。文献[11]基于图论 d -hop 支配集构建虚拟主干网络(VBN, virtual backbone network),并提出 $O(d \log(N))$ -近似算法有效权衡每轮拓扑更新的路由开销、响应时间和维护成本。考虑到应急场景中频繁的拓扑变化和多跳链路繁重的路由开销,基于联盟图博弈的应急通信网络拓扑控制算法^[12]将联盟博弈引入时变拓扑图,通过构建远程传输链路(LL, long link)实现拓扑连通性、平均传输时延与链路损耗 3 种性能之间的权衡优化。

上述研究工作普遍采用单频段组网架构,网络节点由于工作在同一频段需要合理分配频谱资源和时分复用以避免信道冲突。首先,当网络负载较高或节点密度较大时,冲突概率急剧上升,会导致带宽资源消耗于冲突检测和退避等待;当网络节点稀疏且节点间距较大时,单频网络难以兼顾控制信令的全域流转和业务数据的高效传输。同时由于节点间控制信息交互的时延会造成网络拓扑状态更新滞后,进而引发业务数据频繁重传问题。其次,时分复用的静态时隙分配机制难以适配数据类型和流量的动态变化^[13],导致通信资源利用率较低。此外,在应急场景中,无人机的高机动性导致通信链路频繁变化,不仅难以保障网络的全域连通性,也使稀疏拓扑结构的应急通信弱网难以承载业务数据传输的高吞吐量需求。采用低频段组网覆盖范围广,更便于维持网络全域连通性与拓扑更新,但带宽难以满足业务数据传输的高吞吐量需求;而高频段虽可凭借高带宽优势承载业务数据传输需求,但信号绕射能力弱、易受环境干扰,难以保证高机动环境下的链路稳定性。

为解决上述单频组网全域覆盖能力弱、异构数据传输适配性差、网络稳定性与传输实时性难以兼顾等痛点问题,亟须设计基于控制信息与业务数据分离传输的网络架构。软件定义网络(SDN, software defined network)作为网络虚拟化的核心技术之一,可将网络设备节点的控制功能与网络信息转发功能从硬件中解耦,使路由决策、拓扑管理等功

能以软件模块的形式实现网络的集中管控与灵活编程。本文采用 SDN 的传控分离思想^[14]将无人机自组网中的路由决策与拓扑管理等控制功能映射至控制平面，而业务数据传输功能则映射至数据平面。在具体实现上，控制平面采用 Sub-1 GHz 频段组网，利用其高穿透性与强绕射能力实现对无人机自组网的全域覆盖与稳定控制。数据平面则依托具有丰富频谱资源的高频段构建大容量和低时延的远程直连链路，以满足业务数据在实时性和稳定性方面的传输需求。因此，本文提出了一种基于高低双频链路的无人机快速组网算法，将传输短包的的控制平面与传输长包的数据平面在物理链路上进行分离以实现网络的全域连通与数据高效传输。本文主要研究工作如下。

1) 考虑无人机飞控等短包控制类型数据和音视频等长包业务类型数据的差异化传输需求，提出了控制平面与数据平面分离的高低双频动态拓扑组网架构，以高穿透性低频链路维持控制平面的全域连通，以大带宽高频链路满足局部业务数据高效传输要求。

2) 设计了全域连通的双频链路无人机群快速应急组网方法，在控制平面设计基于序数势博弈的组网算法，通过改进节点功率梯度以动态优化各节点发射功率从而构建全域连通的控制平面网络；在数据平面将业务集群映射为联盟并用时变图刻画无人机业务关系与通信链路，设计基于联盟图博弈的数据平面组网优化算法以降低无人机业务集群内的平均通信时延，保障业务数据的实时传输。

3) 采用 NS-3 仿真验证本文方法的有效性。在无人机集群的不同密度、速度、通信负载及信道场景下，本文方法可在保持网络全域连通的同时，有效降低平均路径时延且在应对拓扑突变时收敛速度更快。

1 系统模型和问题表述

为提升无人机群快速应急组网全域连通能力，本文提出了双频链路无人机群应急组网架构，如图 1 所示。其中 V 架无人机配备高低 2 个频段通信模块进行独立分层组网^[15]，同时配备 SDN 流量协调控制器用于分离控制信息与业务数据的数据流，实现在不同频段链路上分离传输^[14]。无人机在应急场景中执行任务过程划分为 T 个时隙，其中

$t \in \{1, 2, \dots, T\}$ 。在每个时隙 t 内，视无人机为静态，基于图论将双频链路无人机通信拓扑结构分别表示为控制平面拓扑图 $G_c(N(t), L_c(t))$ 和数据平面拓扑图 $G_d(N(t), L_d(t))$ ，其中 $N(t)$ 表示 t 时刻所有无人机节点的集合， $L_c = [e_{ij}^c]$ 和 $L_d = [e_{ij}^d]$ 分别表示节点集 N 中控制平面和数据平面的边集。节点 i 与 j 之间建立的控制或数据双向通信链路分别表示为 $e_{ij}^c = 1$ 和 $e_{ij}^d = 1$ 。

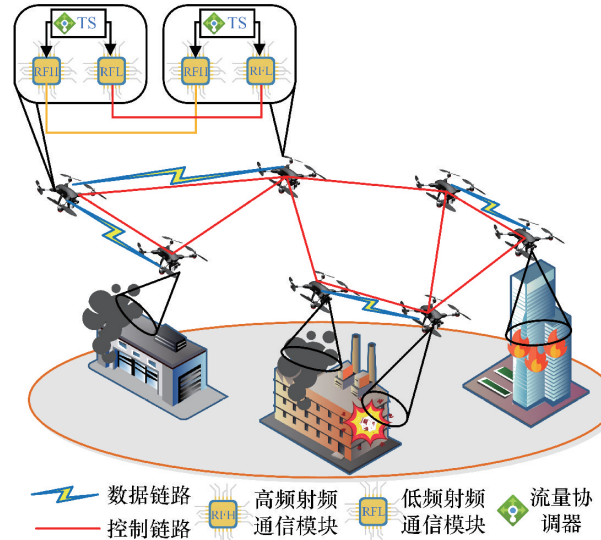


图1 双频链路无人机群应急组网架构

1.1 信道模型

考虑应急场景中通信易受楼宇遮挡影响，采用基于概率视距（LoS, line of sight）的城市低空信道模型^[16]。定义无人机在 t 时刻的坐标 $\mathbf{q}^t = [x^t, y^t, z^t] \in P^1 \times 3$ ，则 2 个无人机之间的信道增益为

$$g_{ij}^t = \sqrt{\beta_{ij}^t} h_{ij}^t \quad (1)$$

其中，小尺度衰落因子 h 为复变随机变量且满足平方期望为 1，即 $E\{|h|^2\} = 1$ 。大尺度衰落因子 β 则根据视距或非视距（NLoS, non-line-of-sight）情况表示为

$$\beta_{ij}^t = \begin{cases} \frac{1}{\eta_1} \left(\frac{4\pi f_c d_{ij}^t}{c} \right)^{-\alpha}, & \text{LoS} \\ \frac{1}{\eta_2} \left(\frac{4\pi f_c d_{ij}^t}{c} \right)^{-\alpha}, & \text{NLoS} \end{cases} \quad (2)$$

其中， f_c 为载波频率， α 为路径损耗指数， η_1 和 η_2

($\eta_2 > \eta_1 > 1$) 分别为 LoS 和 NLoS 情况下的额外路径损耗系数, 无人机 i 和 j 之间的间距为 $d_{ij}^t = \sqrt{(x_i^t - x_j^t)^2 + (y_i^t - y_j^t)^2 + (z_i^t - z_j^t)^2}$, c 为光速。根据无人机之间的相对位置、仰角和所处环境, 无人机 i 和 j 之间的 LoS 概率为

$$\pi_{ij, \text{LoS}}^t = \frac{1}{1 + C \exp(-D[\theta_{ij}^t - C])} \quad (3)$$

其中, C 表示基于载波频率的传播参数, D 表示郊区、城市或建筑物密集区域等环境类型下的参数,

$$\theta_{ij}^t = \left(\frac{180}{\pi}\right) \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{(z_i^t - z_j^t)^2}}{d_{ij}^t}\right)$$
 表示仰角。将式(3)

代入式(2)可得无人机在视距概率场景下的信道增益为

$$\beta_{ij}^t = \pi_{ij, \text{LoS}}^t \frac{1}{\eta_1} \beta_0 (d_{ij}^t)^{-\alpha} + (1 - \pi_{ij, \text{LoS}}^t) \frac{1}{\eta_2} \beta_0 (d_{ij}^t)^{-\alpha} = \hat{\pi}_{ij, \text{LoS}}^t \beta_0 (d_{ij}^t)^{-\alpha} \quad (4)$$

其中, 正则化视距概率 $\hat{\pi}_{ij, \text{LoS}}^t = \pi_{ij, \text{LoS}}^t \left(\frac{1}{\eta_1}\right) + (1 - \pi_{ij, \text{LoS}}^t) \left(\frac{1}{\eta_2}\right)$, 单位距离信道增益 $\beta_0 = \left(\frac{4\pi f c}{c}\right)^{-\alpha}$ 。

假设无人机通信系统采用正交频分多址方式, 令 p_j^{tr} 为无人机 j 的发射功率, σ^2 表示当前环境噪声功率, 则无人机 i 接收到无人机 j 的信号功率 $p_{ij}^r(t) = p_j^{\text{tr}}(t) \beta_{ij}^t$ 。在 t 时刻下无人机 i 和 j 之间信道的信噪比为

$$\gamma_{ij}^t = \frac{p_j^{\text{tr}}(t) |g_{ij}^t|^2}{\sigma^2} \quad (5)$$

1.2 性能指标

1.2.1 吞吐量

无人机节点间传输的短包控制信息和长包业务数据在应急通信场景中可靠性、协议开销等传输特性存在差异^[3], 特别是短包控制信息对高可靠性的严格要求导致其实际传输速率偏离香农容量理论值。根据有限码长理论^[17], 无人机短包控制信息的最大吞吐量可表示为

$$R_{ij}^c(t) = B \left(\text{lb}(1 + \gamma_{ij}^t) - \sqrt{\frac{V_{\text{disp}}}{l}} \frac{Q^{-1}(\epsilon)}{\ln 2} \right) \quad (6)$$

其中, B 为信道带宽, γ_{ij}^t 为 t 时刻无人机 i 和 j 之间信道的信噪比, $V_{\text{disp}} = 1 - (1 + \gamma_{ij}^t)^{-2}$ 为信道色散

值, l 为码长, $Q^{-1}(\epsilon)$ 为高斯 Q 函数的反函数, 表示给定目标错误概率 ϵ 对应的标准高斯分布分位数。

业务数据的数据包长较大, 协议开销被有效分摊, 且误码率要求相对宽松 ($\leq 10^{-3}$ 量级)。因此, 无人机长包业务数最大吞吐量逼近香农容量理论值极限。

$$R_{ij}^d(t) = B \text{lb}(1 + \gamma_{ij}^t) \quad (7)$$

1.2.2 路径时延

定义网络中任意两节点 m 和 $n(m, n \in N(t))$ 之间通信时延为 $T_{m,n}(t)$, 传输数据包长为 S_{pak} , m 到 n 的最短路径为 $H_{m,n}$, 属于最短路径 $H_{m,n}$ 的节点 i 到 j 单跳传输速率为 $R_{ij}(t)$, 则 $T_{m,n}(t)$ 可表示为

$$T_{m,n}(t) = \sum_{(i,j) \in H_{m,n}} \frac{S_{\text{pak}}}{R_{ij}(t)} \quad (8)$$

平均路径时延 $T(t)$ 为网络中所有节点以单/多跳的方式到达其余所有节点时延的平均值, 可表示为

$$T(t) = \frac{1}{V(V-1)} \sum_{m,n \in N(t)} T_{m,n}(t) \quad (9)$$

1.2.3 链路成本

在应急场景频谱资源受限的条件下, 定义无人机 i 到 j 构建远程直连链路的通信开销为

$$c_{ij}(t) = c_0 |d_{ij}^t| \quad (10)$$

其中, c_0 为单位距离链路成本, d_{ij}^t 为无人机 i 到 j 的直线距离。

1.3 问题表述

针对上述双频组网系统模型, 综合考虑短包控制类信息的全域可靠传输需求和长包业务类数据的大带宽低时延传输需求, 采用分布式节点功率分配策略构建全域连通的控制平面网络, 再建立远程直连链路构建面向业务集群的低时延数据平面网络, 如图 2 所示。在控制平面, 无人机通过局部信息交互分布式选择功率分配策略, 在保证网络全域连通性的同时最小化控制平面拓扑构建的平均功率, 为数据平面预留最大可用功率资源; 在数据平面, 基于控制信息的全域流转, 无人机数据平面根据各节点功率余量构建业务集群内的远程数据链路, 旨在动态优化网络拓扑以最小化业务集群内数据传输的平均路径时延, 从而满足应急场景的实时性需求。

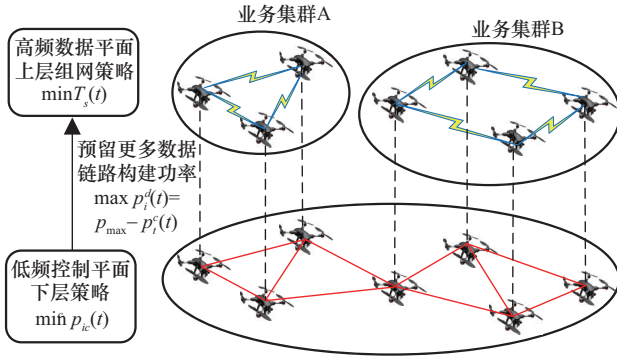


图2 基于控制与数据双频链路的分层组网模型

设 p^c 和 p^d 为所有节点的低频控制平面和高频数据平面组网功率分配集合。无人机自组网中两节点构建直传通信链路要求双向有效，即两节点的接收功率均需满足正常通信的阈值 ($p_{ij}^r, p_{ji}^r \geq p_{th}$ ，其中 p_{ij}^r 和 p_{ji}^r 分别为节点 i 接收到节点 j 发送信号的功率和节点 j 接收到节点 i 发送信号的功率， p_{th} 为正常通信接收功率阈值)。同时，每架无人机的功率分配受最大发射功率 p_{max} 限制，即 $p_{max} \geq p_i^c + p_i^d$ 。因此，无人机的双频组网拓扑结构由无人机的功率分配集合 $p = [p_1, \dots, p_i, \dots, p_V]$ 决定，其中 p_i 表示无人机 i 的功率分配策略，包括无人机节点 i 低频控制平面组网功率 p_i^c 和高频数据平面组网功率 p_i^d 。

1.3.1 控制平面组网问题

在应急场景中，无人机作为独立决策个体在网络形成之前需要根据自身所获得的局部信息来确定发射功率以分布式构建控制平面网络。因此，采用博弈 $\mathcal{G}_i = (\mathcal{N}_i, \mathcal{X}_i, \mathcal{U}_i)$ 建模控制平面组网问题，通过图结构和功率分配刻画节点间的链路构建关系，实现网络拓扑分布式优化。

参与者： \mathcal{N}_i 是 t 时刻博弈参与者， $\mathcal{N}_i = \{1, 2, \dots, V_i\}$ ，其中 \mathcal{X}_i 为 t 时刻无人机网络中的节点数量。

策略： \mathcal{X}_i 是无人机节点的策略集。参与者的策略是指 t 时刻无人机控制平面的发射功率分配策略。定义每个无人机节点的功率分配策略为 $x_i(t) \in \mathcal{X}_i(t)$ ，其中 $x_i(t) = \{p_{max}^c, p_1^c, p_2^c, \dots\}$ 为无人机节点 i 在 t 时刻的可行功率调整策略空间。

效用： \mathcal{U}_i 表示 t 时刻无人机网络中所有节点总效用，可表示为

$$U_i = \sum_{i=1}^{V_i} u_i(x_i(t), x_{-i}(t)) \quad (11)$$

其中， $u_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为 t 时刻无人机 i 的效用^[18]，

且 $u_i(x_i(t), x_{-i}(t)) = w l_i(x_i(t), x_{-i}(t)) - x_i(t)$ ， $x_i(t)$ 为 t 时刻无人机 i 的发射功率即无人机 i 当前策略， $x_{-i}(t)$ 为除无人机 i 以外其他节点的策略集合，且 $\mathcal{X}_i = x_i(t) \cup x_{-i}(t)$ ， $l_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为 t 时刻无人机 i 采用多跳形式的可通信节点数量。 w 表示每个可通信节点为无人机 i 带来的收益，其值在本文中定义为大于等于控制平面最大组网功率 p_{max}^c 的常数。对于总效用函数式(11)，当无人机降低发射功率时，可通信节点数量减小导致的效用降低大于功率减小带来的收益，所以无人机更倾向于保证能与更多的节点通信以获得更高的效用值。因此，在控制平面网络全域连通的情况下， $\max u_i(x_i(t))$ 与 $\min p_i^c(t)$ 等效。

当所有无人机节点以最大功率组建控制平面网络时，假设控制平面网络一定为全域连通状态，即对于 $\forall i$ ，令 $x_i = p_{max}^c$ 有 $l_i = V_i - 1$ 。

定义1 如果对于 t 时刻的无人机网络，存在策略集 \mathcal{X}_i' ，对 $\forall i \in \mathcal{N}_i$ 和 $\forall x_i(t) \in \mathcal{X}_i(t)$ 有 $u_i(x_i'(t), x_{-i}'(t)) \geq u_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ ，则该策略集 \mathcal{X}_i' 为博弈 \mathcal{G}_i 的一个纳什均衡 (NE, nash equilibrium)。

定义2 如果对于参与者 $\forall i \in \mathcal{N}_i$ 和策略 $\forall a_i(t), b_i(t) \in \mathcal{X}_i(t)$ ，存在函数 U 使 $U(a_i(t), a_{-i}(t)) - U(b_i(t), a_{-i}(t)) > 0 \Leftrightarrow u_i(a_i(t), a_{-i}(t)) - u_i(b_i(t), a_{-i}(t)) > 0$ ，则函数 U 被称为博弈 \mathcal{G}_i 的序数势函数。

定理1 博弈 \mathcal{G}_i 为序数势博弈，且 $U(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为该博弈的序数势函数。

$$U(x_i(t), x_{-i}(t)) = w \sum_{i \in \mathcal{N}_i} l_i(x_i(t)) - \sum_{i \in \mathcal{N}_i} x_i(t) \quad (12)$$

证明 假设节点 i 可选择的功率分配决策有 a_i 和 b_i ，则选择这2种不同决策的效用函数之差表示为

$$\Delta u_i = u_i(a_i, a_{-i}) - u_i(b_i, a_{-i}) = w [l_i(a_i, a_{-i}) - l_i(b_i, a_{-i})] - (a_i - b_i) \quad (13)$$

在相同决策下，序数势函数之差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta U &= U(a_i, a_{-i}) - U(b_i, a_{-i}) = \\ &= w [l_i(a_i, a_{-i}) - l_i(b_i, a_{-i})] - (a_i - b_i) + \\ &= w \left[\sum_{j \in \mathcal{N}_i, j \neq i} \{l_j(a_i, a_{-i}) - l_j(b_i, a_{-i})\} \right] = \\ &= \Delta u_i + w \left[\sum_{j \in \mathcal{N}_i, j \neq i} \{l_j(a_i, a_{-i}) - l_j(b_i, a_{-i})\} \right] \quad (14) \end{aligned}$$

对于可通信节点数 $l_i(x_i(t))$ ，如果采用更大功

率即 $x'_i(t) > x_i(t)$ 时, 必存在 $l_i(x'_i(t)) \geq l_i(x_i(t))$, 则 $l_i(x_i(t))$ 为单调递增函数。同时, 由于 $w \geq p_{\max}$, $w[l_i(a_i, a_{-i}) - l_i(b_i, a_{-i})]$ 必与 Δu_i 同号。因此, $\text{sgn}(\Delta u_i) = \text{sgn}(\Delta U)$ 。根据定义 2 可证, 函数 $U(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为博弈 \mathcal{G}_i 的序数势函数, 博弈 \mathcal{G}_i 为序数势博弈。证毕。

根据文献[18], 已证明序数势博弈必定存在一个纳什均衡策略集。由于控制平面组网采用全分布式实现, 每架无人机都根据局部信息调整自身功率来实现自身效用的最大化, 即

$$\arg \max_{x_i(t) \in \mathcal{X}_i(t)} \left\{ u_i(x_i(t), x_{-i}(t)) \right\}, \forall i \in \mathcal{N}_i \quad (15)$$

1.3.2 数据平面组网问题

在构建全域连通的控制平面组网后, 依据无人机群所搭载的业务类型, 将其划分为多个业务集群。定义业务集群图为 $G_s(N(t), L_s(t))$, 其中 $N(t)$ 表示 t 时刻无人机节点集合, $L_s = [e_{ij}^s]$ 表示业务关系边集合, 其中 $ij \in N(t)$ 。当无人机节点 i 与 j 执行相同业务时, 即处于同一业务集群, 则 $e_{ij}^s = 1$; 反之, 则 $e_{ij}^s = 0$ 。由于业务数据交互主要存在于同一业务集群内, 因此仅考虑在业务集群内部构建数据链路以形成数据平面拓扑图 $G_d(N(t), L_d(t))$ 。对于面向业务集群的数据平面组网, 重新定义网络的平均路径时延^[19]为

$$T_s(t) = \frac{1}{V_s} \sum_{q=1}^{V_s} \left(\frac{1}{V_q(V_q - 1)} \sum_{ij \in S_q} T_{ij}(t) \right) \quad (16)$$

其中, S_q 为第 q 个业务集群, V_s 为业务集群数量, V_q 为第 q 个业务集群中无人机数量, $T_{ij}(t)$ 为无人机节点 i 到 j 的通信时延。为了保证无人机业务数据传输的高效性, 以最小化面向业务集群的平均路径时延为优化目标, 以链路构建成本、节点度、点对点传输时延阈值等为约束, 建模数据平面组网问题, 如式(17)所示。

$$\begin{aligned} & \min_{e_{ij}^d, i, j} T_s(t) \\ & \text{s.t.} \begin{cases} \text{C1: } \sum_{ij} c_{ij}(t) e_{ij}^d(t) \leq c_{\text{th}}, i, j \in N(t) \\ \text{C2: } \deg(i) \leq e_{\text{th}}, i \in N(t) \\ \text{C3: } p_i^d(t) \leq p_{\max} - p_i^c(t), i \in N(t) \\ \text{C4: } T_{ij}^d \leq T_{\text{th}}, i, j \in N(t) \\ \text{C5: } e_{ij}^d(t) \in \{0, 1\}, i, j \in N(t) \\ \text{C6: } e_{ij}^c(t) \in \{0, 1\}, i, j \in N(t) \\ \text{C7: } e_{ij}^d(t) = 1 \Rightarrow e_{ij}^c(t) = 1 \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

其中, 约束 C1 引入远程链路构建容忍成本 c_{th} 以约束数据平面构建的链路总成本^[19]; 约束 C2 设置单节点的直传数据链路数量上限阈值 e_{th} 以保证无人机节点的有效带宽和子信道分配的充分正交性; 约束 C3 要求数据平面的链路构建功率不超过控制平面链路构建后的功率余量, 即约束数据平面远程链路构建距离; 约束 C4 设定点对点最小传输时延阈值 T_{th} 以满足关键业务数据的实时性传输需求; 约束 C7 表示节点 i 和 j 构建数据链路的条件为两节点属于同一业务集群。在优化问题式(17)中, 数据平面组网的决策变量 c_{ij}^d 只能取 0 或 1, 并且约束是线性的。因此, 该优化问题是一个 0~1 规划问题, 通过还原技术^[20]可以证明它是 NP-hard 问题。该问题的非凸性导致传统的优化方法难以高效求解。

传统集中式优化算法(如交替优化、逐次逼近法)在解决多约束问题时, 需在每轮组网周期内通过多次迭代计算无人机网络整体性能以搜索最优决策。尽管此类方法能获得高质量的近似最优解, 但其计算复杂度较高, 决策易出现滞后, 难以满足拓扑快变应急无人机的实时组网需求。联盟图博弈则进一步将图论融入联盟博弈框架, 通过构建多个不相交联盟映射不同用户集合, 并刻画所有用户间的交互关系(即动态调整用户构成的网络图结构), 实现所有联盟总效用函数的优化。考虑到数据平面组网问题包含业务集群图 $G_s(N(t), L_s(t))$ 与通信拓扑图结构 $G_d(N(t), L_d(t))$, 且平均路径时延(优化目标)与通信拓扑强相关, 本节将原优化问题式(17)建模为联盟图博弈问题: 将业务集群抽象为联盟博弈, 用时变图动态刻画无人机的业务属性与通信关联; 以原问题的优化目标平均路径时延与约束 C1(链路构建成本)共同构成效用函数; 以远程直连链路构建作为节点的博弈策略; 同时将原问题的约束 C2~C7 转化为博弈策略集的限制条件, 以缩小策略搜索空间, 从而快速求得较优组网决策。联盟图博弈 $\mathcal{G}_i^d = (\mathcal{N}_i^d, \mathcal{X}_i^d, \mathcal{U}_i^d)$ 定义如下。

参与者: \mathcal{N}_i^d 是 t 时刻博弈参与者, $\mathcal{N}_i = \{1, 2, \dots, V_i\}$, 其中 V_i 为 t 时刻无人机网络中的节点数量, 即无人机节点集合 $N(t)$ 。

策略: \mathcal{X}_i^d 是 t 时刻无人机数据平面采用的直连链路构建策略。

效用: \mathcal{U}_i^d 是 t 时刻无人机网络中所有节点总效用。

策略集：定义联盟图博弈 \mathcal{G}_i^d 中无人机 i 的策略为 $x_i^d \in \mathcal{X}_i^d$ ， \mathcal{X}_i^d 表示节点 i 所有可行的策略集合， $x_i^d = \{e_{i,1}^d, \dots, e_{i,j}^d\}$ ，其中若 $e_{i,j}^d = 1$ ，则表示节点 i 与 j 构建远程直连链路，为 0 则不构建。由于约束 C2~C7，必须满足：1) $|x_i^d| \leq e_{th}$ ，表示限制与节点 i 相关的 LL 数量；2) $p_{i,max}^d(t) = p_{max} - p_i^c(t) > \frac{p_{th}}{\beta_{ij}^t}$ ，表示节点 i 以最大剩余功率 $p_{i,max}^d(t)$ 发送信息被节点 j 接收；3) $T_{ij}^t \leq T_{th}$ ，表示建立的 LL 可满足数据点到点最小传输时延阈值；4) $e_{i,j}^d = 1$ ，表示节点 i 与 j 属于同一业务集群。因此节点 i 的策略集规模很小。同时定义 $x_{-i}^d = X_i^d \setminus x_i^d$ 为除节点 i 外所有节点的可选择策略。此外， $X_i^d = (x_1^d, x_2^d, \dots, x_V^d) = (x_i^d, x_{-i}^d)$ 表示博弈策略。

效用函数：在优化问题式(17)中，效用被定义为所有业务集群的网络平均路径时延。对于每个无人机节点，需要考虑自身路径时延以及处于同业务集群（同联盟）中其他无人机节点的平均路径时延。同时，考虑到约束 C1 中远程链路构建容忍成本，本节重新定义博弈 \mathcal{G}_i^d 中无人机 i 的个体效用函数： $u_i^d(x_i^d(t), x_{-i}^d(t)) = -T_{S_k}(x_i^d(t)) - c_i(x_i^d(t))$ ，其中 $T_{S_k}(x_i^d(t))$ 为 t 时刻无人机 i 构建远程直连链路后业务集群 S_k 的平均路径时延， $c_{ij}(t)$ 为节点 i 按照 $x_i^d(t)$ 策略构建 LL 的成本，引入负号使每个节点都趋向效用最大化。因此，联盟图博弈的优化目标可表示为

$$\max_{x_i^d \in \mathcal{X}_i^d} \mathcal{U}_i^d = \sum_{i=1}^{V_i} u_i^d(x_i^d(t), x_{-i}^d(t)) \quad (18)$$

式(18)不但考虑新构建链路对所在联盟的传输性能收益，同时权衡链路构建开销。博弈效用函数 \mathcal{U}_i^d 为节点参与者的效用函数之和，与定理 1 类似，易证 \mathcal{U}_i^d 为 u_i^d 的序数势函数，即函数值变化趋势相同。

2 双频链路分层组网算法

针对上述双频链路分层组网问题，根据控制平面和数据平面的不同优化目标和约束条件，分别设计基于序数势博弈的控制平面组网算法和基于联盟图博弈的数据平面组网算法，从而形成控制平面与数据平面分离的无人机群双频链路分层组网算法。

2.1 基于序数势博弈的控制平面分布式组网算法

为求解优化问题式(15)以获得节点控制平面功率分配策略，基于序数势博弈的控制平面分布式组网算法主要由拓扑建立、功率调整和拓扑更新 3 个阶段组成。

1) 拓扑建立阶段。在初始组网阶段，各无人机首先以最大功率广播信标帧，该信标帧包含节点 ID、坐标等自身信息和连接请求指令。节点侦听到邻近节点的广播信号时回复确认字符（ACK, acknowledgment character）确认帧实现邻居发现。在双向 ACK 握手成功后，节点间建立具有控制信令交互能力的双向链路。由此可得各无人机的最大可通信节点集合为 $L_i(p_{max})$ ，有 $|L_i(p_{max})| = l_i(p_{max})$ ，以及初始控制平面拓扑图。

2) 功率调整阶段。在该阶段采用随机或者询问的方式选择无人机 i ，采用不同功率调整方法改变无人机功率分配决策 $\tilde{x}_i(t)$ 以提升个体效用 $u_i(\tilde{x}_i(t), x_{-i}(t)) > u_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ 。

3) 拓扑更新阶段。无人机 i 在每次更新决策后广播自身功率，其余无人机根据无人机 i 的变化更新自身拓扑。重复执行功率调整直到不存在无人机更新功率决策。在每轮功率调整迭代完成后，网络节点采用最终决策功率组建控制平面网络。

算法实现伪代码如算法 1 所示。

算法 1 基于序数势博弈的控制平面分布式组网

输入 对于每个节点，输入邻居节点信息包括位置、速度等

输出 节点的控制平面组网功率等级和 $G_c(t)$

1) 初始化

对于 $\forall i \in \mathcal{N}_0$ ，令 $x_i(0) = p_{max}$ ，广播自身拓扑信息并发现周围邻居节点，从而构建初始控制平面拓扑 $G_c(0) = (N(0), L_c(0))$ ；初始化拓扑构建时刻 $t = 0$

2) if $t = n\Delta t (n = 1, 2, \dots)$ || $|N(t)| \neq |N(t-1)|$ do

3) flag=1

4) while flag=1 do

5) flag=0

6) for $\forall i \in \mathcal{N}_i$ do

7) 调整无人机 i 功率分配决策 $\tilde{x}_i(t)$

8) if $u_i(\tilde{x}_i(t), x_{-i}(t)) > u_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ do

9) $x_i(t) = \tilde{x}_i(t)$

- 10) 广播更新后的功率等级
- 11) flag=1
- 12) end if
- 13) 更新 $G_c(t)$
- 14) end for
- 15) end while
- 16)end if

在功率调整阶段,区别于以局部最佳响应调整功率的最优改进算法(MIA, max-improvement algorithm)^[18]和以固定变量调整功率的增量改进算法(DIA, δ -improvement algorithm)^[9],本文提出的基于功率等级的梯度改进算法(GIA, gradient-improvement algorithm)通过实时评估节点间通信状态,确定维持通信稳定所需最小发射功率阈值,并将其量化为离散功率等级,以更低的功率调整频次构建全域连通的控制平面网络。对于每个节点 $\forall i \in \mathcal{N}_t$, GIA 重新定义功率策略空间 $\tilde{\mathcal{X}}_i(t) = \{p_{\max}, p_{i,v_1}, \dots, p_{i,v_m}, \dots, p_{i,v_M}\}$, 其中 M 为节点 i 以最大功率建立直传通信链路的数量, $p_{i,v}$ 为节点 i 以功率 $p_{i,v}$ 发射信息可满足节点 v 的接收信号功率阈值 p_{th} , 即 $p_{i,v} = \frac{p_{th}}{\beta_{i,v}^t}$ 。 $\tilde{\mathcal{X}}_i(t)$ 为递减有序集合, 即 $p_{i,v_m} \geq p_{i,v_{m+1}}$, p_{i,v_m} 可视为不同功率等级, 而该策略空间中的元素值可根据邻居节点的信息交互获取的坐标信息和接收信号功率计算得出。在每轮的功率调整阶段, 节点尝试将功率下降到低一级的功率等级。如果所选功率等级的效用比之前功率等级的效用更高, 则采用当前选择的功率等级, 反之则恢复到之前的功率等级。设当前无人机节点 i 的功率等级为 $x_i(t) = p_{i,v_m}$, 其中 $m = 1, \dots, M$ 。在保持除节点 i 之外的功率等级不变的情况下, 尝试下降节点 i 的功率等级, 可得

$$\tilde{x}_i(t) = \arg \max_{x'_i(t) \in \{p_{i,v_m}, p_{i,v_{m+1}}\}} \{u_i(x'_i(t), x_{-i}(t))\} \quad (19)$$

在网络拓扑动态调整过程中, 各节点迭代降低其功率等级以重构可通信节点集合, 从而更新全局网络拓扑。具体而言, 当某一节点根据当前网络拓扑状态完成功率等级自适应调整后, 将立即广播其功率等级、连接状态等参数信息, 其余节点在接收此控制报文后, 将同步刷新本地链路状态表。各节点依据更新后的拓扑信息, 再进行功率等级下降调整判断是否能提升个体效用函数 u_i , 若能提升则保留该功率等级, 反之则调整至上一轮功率等级, 不

断迭代直至所有节点均未触发功率等级更新, 则判定此时策略为纳什均衡解。

推论 1 博弈 \mathcal{G}_t 在经过有限次迭代后一定收敛至纳什均衡状态。

证明 博弈 \mathcal{G}_t 中各节点的策略集最大数目为 $V_t - 1$, 因此 \mathcal{G}_t 可尝试的策略集 \mathcal{X}_i 的数量最大值为 $V_t(V_t - 1)$, 且为有限值。根据文献[9], 有限序数势博弈一定会收敛至纳什均衡状态。证毕。

推论 2 对博弈 \mathcal{G}_t , 最终收敛的纳什均衡解为帕累托最优且该解可构建全域连通的局部能效最优拓扑。

证明 假设存在节点 i , 采用策略 $x_i(t)$ 使得 $u_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为当前网络拓扑状态下的最大值, 但 $G_c(t)$ 为非全域连通的。因此, 易知 $l_i(x_i(t), x_{-i}(t)) \leq V_t - 2$, V_t 为此时网络中无人机总数。由假设 1 可知, 至少存在一个功率分配策略使网络全域连通, 即 $l_i(x'_i(t), x_{-i}(t)) = V_t - 1$ 。因此, 有

$$\begin{aligned} u_i(x_i(t), x_{-i}(t)) &= w l_i(x_i(t), x_{-i}(t)) - x_i(t) \leq \\ &w(V_t - 2) - x_i(t) = \\ &w(V_t - 1) - x'_i(t) - (w - (x'_i(t) - x_i(t))) = \\ &u'_i(x_i(t)) - (w - (x'_i(t) - x_i(t))) \end{aligned} \quad (20)$$

由于 $w \geq p_{i,\max}$ 且 $0 < x_i(t), x'_i(t) \leq p_{\max}$, 则 $u_i(x_i(t), x_{-i}(t)) < u_i(x'_i(t), x_{-i}(t))$ 。该结论与假设 $u_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为最大值不符, 因此在 GIA 功率调整过程中, 每轮功率迭代均能保证组网拓扑的全域连通性。在功率迭代时, 效用函数 $u_i(x_i(t), x_{-i}(t)) = w l_i(x_i(t), x_{-i}(t)) - x_i(t)$ 中的 $w l_i(x_i(t), x_{-i}(t))$ 为常数值, 所以效用的提升对应功率下降值。因此 GIA 在每次迭代(执行功率等级下降)时均会提升网络整体效用函数值 U_t 直到不存在节点功率不再改变, 即达到纳什均衡状态。依据帕累托最优的定义, 可得该纳什均衡点即为帕累托最优解。证毕。

计算复杂度。在执行 GIA 功率调整时, 根据邻居信息生成功率等级策略集 $\tilde{\mathcal{X}}_i(t)$, 该过程的计算复杂度为 $\mathcal{O}(M)$, 其中 M 为节点 i 以最大功率可建立直传链路的数量, 有 $M \leq V_t - 1$ 。对于每轮功率迭代, 效用函数的计算复杂度为 $\mathcal{O}(V_t)$, 所以控制平面分布式组网算法的计算复杂度为 $\mathcal{O}(M + IV_t)$, 其中 I 为迭代轮数。对于 GIA, 节点的最大迭代轮数情况为网络中其余所有无人机均可与该节点建立直连链路, 且经过迭代后, 该节点的功率等级逐步

下降至最小功率等级, 最终仅与一个节点维持链路连接。在此情况下, 迭代轮数 $I=V_i-1$ 。而节点的最小迭代轮数则对应两类情况: 一是该节点以最大功率仅能与一个节点构建直连链路; 二是该节点仅执行一次功率等级下降, 便收敛至纳什均衡状态。基于上述最大与最小迭代轮数分析, 可推导出分布式算法的计算复杂度下限为 $\mathcal{O}(M+V_i)$, 上限为 $\mathcal{O}(M+V_i(V_i-1))$ 。

在功率调整方法设计中, MIA 在每轮迭代中将节点功率直接调整至最佳响应值, 能够使其快速收敛至纳什均衡状态, 但其收敛性能受节点功率调整顺序影响较大, 且容易陷入效用较低的局部最优解。DIA 采用固定小步长调整策略, 通过大量的策略尝试逐步提升系统效用, 最终逼近全域最优解。然而该方法单节点最大迭代次数为 $\frac{(p_{\max}-p_{\min})}{\delta}$, 其中 δ 为功率调整步长, 因此其较慢的收敛速度并不适配拓扑快变的无人机应急场景。相比之下, GIA 采用非固定自适应步长的方式进行功率等级梯度下降迭代优化, 其步长由节点与邻居节点的通信功率阈值动态决定, 由于功率等级策略集 $\tilde{\mathcal{X}}_i(t)$ 按单调递减顺序排列, 使网络拓扑在功率调整时最多只断开一条链路, 这不仅避免了 DIA 在拓扑稳定时的 2 个相邻功率等级中间的无效步进尝试, 显著减少了迭代次数, 还在收敛速度和解质量上实现了 MIA 和 DIA 的优势互补, 能够以较快的速度收敛至性能更优的纳什均衡点, 更适配无人机应急组网场景。

2.2 基于联盟图博弈的数据平面组网优化算法

通过全域连通的控制平面, 节点可获取网络中其他无人机的坐标、链路连接状态、搭载业务类型等信息以构建高频数据链路用于传输业务数据。对于联盟图博弈模型, 根据优化问题式(17)中约束 C1 可知, 网络建立远程直连链路的总数量存在上限, 其值 N_{th} 取决于当前场景的频谱资源。当构建远程直连链路的数量小于 N_{th} 时, 无人机节点的每个远程直连链路构建都被接受; 当远程直连链路总数等于 N_{th} 时, 节点可以选择增加自身效用而不减少其他节点效用的策略。

定义 3 无人机 i 选择构建直连链路的贡献度为构建链路前后无人机 i 的效用函数之差, 表示为

$$W(x_i^d(t), x_{-i}^d(t)) = T_{S_k}(x_i^{d'}(t)) - T_{S_k}(x_i^d(t)) - c_i(x_i^d(t)) \quad (21)$$

其中, $T_{S_k}(x_i^{d'}(t))$ 为 t 时刻无人机 i 构建远程直连链路前业务集群 S_k 的平均路径时延, $T_{S_k}(x_i^d(t))$ 为 t 时刻无人机 i 构建远程直连链路后业务集群 S_k 的平均路径时延, $c_i(x_i^d(t))$ 为节点 i 按照 $x_i^d(t)$ 策略构建直连链路的成本。

定义 4 如果不存在无人机节点可以通过改变其远程直连链路建立策略来提升网络效用即存在策略集 $\mathcal{X}_i^{d'}$, 对 $\forall i \in \mathcal{N}_i^d$ 和 $\forall x_i^d(t) \in \mathcal{X}_i^d(t)$ 有 $\mathcal{U}_i^d(x_i^{d'}(t), x_{-i}^{d'}(t)) \geq \mathcal{U}_i^d(x_i^d(t), x_{-i}^d(t))$, 则在该策略集下联盟图博弈收敛至纳什均衡状态。

本节设计了一种基于联盟图博弈的数据平面组网优化算法来建立远程直连链路。具体实现思路如下。首先根据控制平面得到全域连通网络中无人机的数量、位置、所属业务集群等信息。然后, 构建业务集群内最小连通图作为初始数据链路, 同时通过无人机剩余最大功率、链路质量等得到每个节点 i 的可行策略集 \mathcal{X}_i^d , 并确定网络可构建的候选链路集 L_d' 。之后每轮迭代时若建立远程直连链路的总数量小于 N_{th} , 则在 L_d' 中选取所处联盟提供最大正贡献的远程直连链路, 将该链路加入链路构建策略集 \mathcal{X}_i^d 并从 L_d' 中删去。若此时建立远程直连链路的总数量等于 N_{th} , 则遍历选取无人机节点 i , 寻找非 i 所在联盟贡献效用最小的无人机节点 j , 并删除与之相关的远程直连链路。同时在与 i 同一联盟中寻找最大正贡献的远程直连链路构建, 如果当前网络效用大于之前网络效用则更新 \mathcal{X}_i^d 和 L_d' , 直至遍历完 2 轮无人机节点不存在策略变化, 则此时策略 \mathcal{X}_i^d 为纳什均衡解。基于上述分析, 该算法实现如算法 2 所示。

算法 2 基于联盟图博弈的数据平面组网优化

输入 当前时隙控制平面各节点组网功率

输出 数据平面组网拓扑 G_d 和策略 \mathcal{X}_i^d

1) 初始化

对每个业务集群建立最小连通图作为初始数据平面拓扑 G_d , 并得到初始数据链路构建策略集 \mathcal{X}_i^d , 根据无人机剩余最大功率、链路质量等信息得到每个节点 i 的可行策略集 \mathcal{X}_i^d , 并确定网络可构建的候选链路集 L_d'

2) while $|\mathcal{X}_i^d| < N_{th} \cup L_d' \neq \emptyset$ do

3) for each $e_{i,j}^d \in L_d'$, 满足 $e_{i,j}^c = 1$ do

4) 寻找 $\max W(x_i^d(t))$, 其中 $i \in \mathcal{N}_i^d$, 并令 $e_{i,j}^d$ 表示此时最大贡献边

5) end for

- 6) $\mathcal{X}_i^d = \mathcal{X}_i^d \cup e_{ij}^d$, 并更新数据平面拓扑 G_d 和 L_d'
- 7) end while
- 8) if $|L_d| = N_{th}$ do
- 9) repeat
- 10) for $\forall i \in \mathcal{N}_i^d$ do
- 11) 寻找 $\min W(x_j^d(t))$, 其中 $j \in \mathcal{N}_i^d \setminus i$
- 12) 删除该远程直连链路 e_j^d
- 13) 寻找 $\max W(x_i^d(t))$, 令 e_i^d 表示此时最大贡献边, 且满足 $e_i^d \in L_d'$ 且 $e_{ij}^s = 1$
- 14) 令 $\mathcal{X}_i^{d'} = \mathcal{X}_i^d \cup e_i^d \setminus e_j^d$
- 15) if $\mathcal{U}_i^d(\mathcal{X}_i^{d'}) > \mathcal{U}_i^d(\mathcal{X}_i^d)$ do
- 16) $\mathcal{X}_i^d = \mathcal{X}_i^{d'}$ 并更新 G_d 和 L_d'
- 17) end if
- 18) end for
- 19) until 遍历完 2 轮策略 \mathcal{X}_i^d 保持不变
- 20) end if

推论 3 本文算法可通过有限次迭代得到纳什均衡解。

证明 由于数据平面构建远程直连链路数量存在上限 N_{th} , 因此效用函数存在最大值。当算法处于远程直连链路添加阶段 (对应算法 2 步骤 2)~步骤 6) 最大迭代次数为 N_{th} 。在远程直连链路调整阶段 (对应算法 2 步骤 7)~步骤 18), 每轮链路调整的性能为非减性且策略空间有限, 由文献[19]中的推论 2 可进一步证明该阶段迭代次数存在上界。当算法收敛时, 假设存在一个策略使 $\mathcal{X}_i^{d'}$, 对 $\forall i \in \mathcal{N}_i^d$ 和 $\forall x_i^d(t) \in \mathcal{X}_i^d(t)$ 有 $\mathcal{U}_i^d(x_i^{d'}(t), x_{-i}^{d'}(t)) \geq \mathcal{U}_i^d(x_i^d(t), x_{-i}^d(t))$ 。这与算法 2 中步骤 14)~步骤 18) 给出的迭代结束条件相悖。因此算法最终可得到纳什均衡解。证毕。

推论 4 本文算法得到纳什均衡解为帕累托最优。

证明 在远程直连链路添加阶段, 策略每次添加最大正效用贡献度的边, 博弈效用值的变化表示为 $\Delta \mathcal{U}_i^d = u_i^d(x_i^d(t), x_{-i}^d(t)) - u_i^d(x_i^{d'}(t), x_{-i}^d(t)) = T_{S_k}(x_i^{d'}(t)) - T_{S_k}(x_i^d(t)) - c_i(x_i^d(t)) = W(x_i^d(t)) > 0$; 在远程直连链路调整阶段, 每次链路迭代调整 (删去贡献度最小边并添加贡献度最大边) 产生的效用值变化为 $\Delta \mathcal{U}_i^d = u_i^d(x_i^{d'}(t), x_{-i}^{d'}(t)) - u_j^d(x_j^d(t), x_{-j}^d(t)) = T_{S_k}(x_j^d(t)) + c_j(x_j^d(t)) - T_{S_k}(x_i^{d'}(t)) - c_i(x_i^{d'}(t))$, 由于算法 2 步骤 15) 约束, 有 $\Delta \mathcal{U}_i^d > 0$ 。因

此, 算法在每次策略更迭时, 效用均提升直至收敛, 满足帕累托最优定义。

计算复杂度: 首先该算法为每个业务集群建立

最小连通图, 其计算复杂度为 $\mathcal{O}\left(\sum_{S_q=1}^{V_s} V_q^2\right)$, 其中 S_q

为第 q 个业务集群, V_s 为业务集群数量, V_q 为第 q 个业务集群中无人机数量。最大最小贡献度的计算复杂度为 $\mathcal{O}(V_q^3)$, 所以远程直连链路添加阶段的计算复杂度为 $\mathcal{O}(I_1 V_q^3)$, 其中 I_1 为该阶段迭代次数, 且最大值为 N_{th} ; 远程直连链路添加阶段的计算复杂度为 $\mathcal{O}(I_2 V_q^3)$, 其中 I_2 为该阶段迭代次数。该算法根据业务集群将无人机划分为多个联盟, 将每次迭代计算的节点规模从 V_i 减少为 V_q , 且 $V_i = \sum_{S_q=1}^{V_s} V_q$ 。

此外, 贡献度可在无人机侧分布式计算, 因此算法 2

的计算复杂度为 $\mathcal{O}\left(\sum_{S_q=1}^{V_s} V_q^2 + \frac{(I_1 + I_2)V_q^3}{V_i}\right)$, 计算复

杂度量级为 $\mathcal{O}(V_i^2)$, 远低于全局遍历算法的计算复杂度 $\mathcal{O}(V_i^{V_i-2})$ 。

2.3 双频链路分层组网算法

综上所述, 本文所提双频链路分层组网算法先执行算法 1, 通过邻居节点信息交互调整自身发射功率, 在确保控制平面网络全域连通的情况下最小化节点功率; 之后根据全局控制信息执行算法 2, 迭代构建远程直连链路以实现业务数据的实时传输; 最终形成控制平面与数据平面分离的无人机群双频网络。具体实现流程如图 3 所示。

3 仿真与性能分析

3.1 参数设置

本节针对应急场景无人机群双频链路组网过程进行仿真。实验仿真场景为 $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m} \times 100\ \text{m}$ 区域, 无人机初始位置随机分布, 移动模型参考集群移动模型^[11], 其他网络仿真参数^[16,19]如表 1 所示。

3.2 算法性能分析

采用 200 次蒙特卡罗仿真对比 GIA 与 MIA 和 DIA 在不同无人机数量 (10~30 架) 下的平均节点功率, 其中 DIA 的功率下降步长分别设置为 0.5 dBm 和 2 dBm。由图 4 可知, 采用 GIA 功率调整方法的节点低频组网模块平均发射功率相比 MIA 降低 42.18%, 步长为 2 dBm 的 DIA 降低 8.54%, 但高于

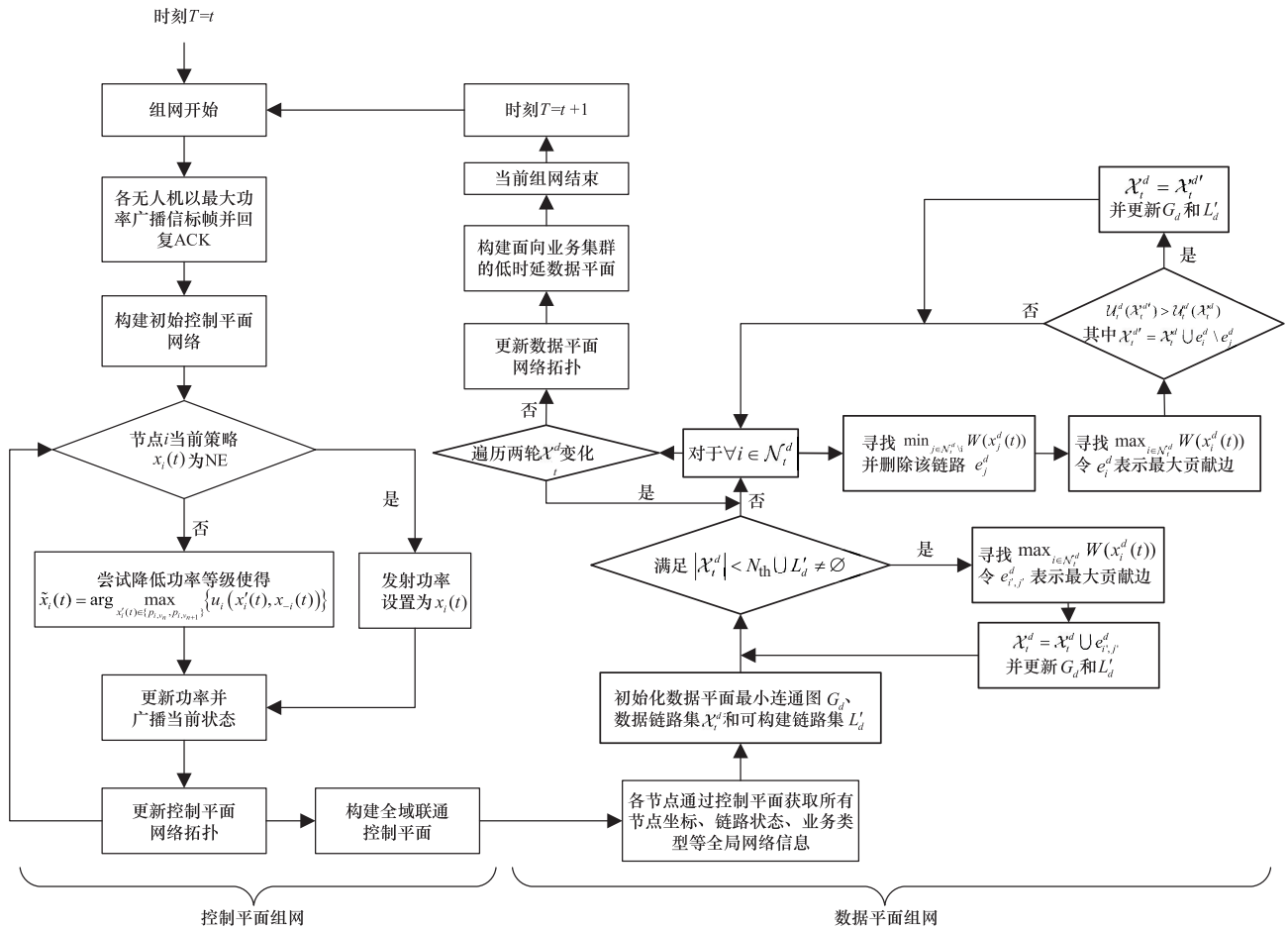


图3 双频链路分层组网算法流程

表1 网络仿真参数

参数	数值	参数	数值
场景类型信道参数 D	0.14	无人机最大发射总功率 p_{\max}/dBm	30
基于载波频率传播参数 C	11.95	无人机接收信号阈值 p_{th}/dBm	-85
信道衰减因子 α	2	单个传输包大小 S_{pak}/MB	1
低频控制平面频段 f_c^L/MHz	840	单位距离链路成本 c_0	0.03
高频数据平面频段 f_c^H/GHz	2.4	单节点数据链路数量阈值 e_{th}	4
噪声功率 σ^2/dBm	-130	单无人机低频控制链路带宽 B^L/MHz	1
额外视距路径损耗 η_1/dB	3	单无人机高频数据链路带宽 B^H/MHz	5
额外非视距路径损耗 η_2/dB	23	短包控制信息误码率要求 ϵ	10^{-6}

步长为 0.5 dBm 的 DIA 6.68%。MIA 在每轮迭代中将节点功率直接下降至最佳响应值，其收敛性能受节点功率调整顺序影响较大，且容易陷入效用较低的局部最优解，因此迭代次数最少，效用最低，节点低频组网模块平均发射功率最大。而 DIA 采用固定小步长调整策略，步长越小，功率

下降的尝试次数越多，迭代次数越多，可近似看作决策离散化的最优搜索过程。因此，相比步长为 2 dBm 的 DIA 和 GIA，步长为 0.5 dBm 的 GIA 迭代次数最多，效用最逼近全局最优解，节点低频组网模块平均发射功率最低。然而，过小的步长导致 DIA 迭代次数（即功率调整尝试次数）远大

于 GIA, 组网决策时间远大于 GIA。如图 5 所示, GIA 迭代次数略低于与步长为 2 dBm 的 DIA, 远低于步长为 0.5 dBm 的 DIA。综合考虑各算法的性能, 采用 GIA 的控制平面组网方法以较低功耗和低计算复杂度可更好适配无人机在高动态应急场景中的应用需求。

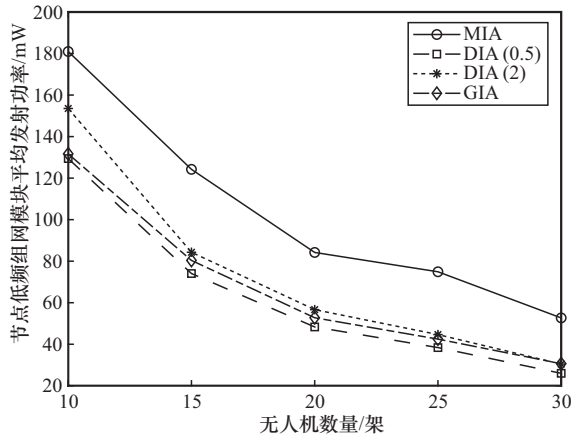


图 4 不同算法下无人机数量与节点低频组网模块平均发射功率的关系

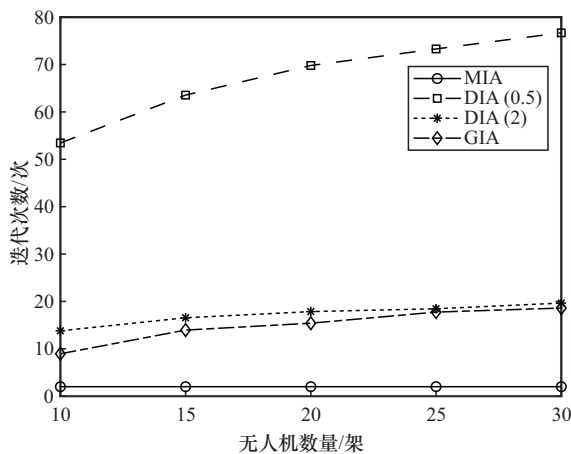


图 5 不同算法的迭代次数

本文运用网络仿真软件 NS-3 对所提双频组网算法、基于临界边的贪心单频组网算法 (CEBG, critical-edge-based greedy algorithm) [19]、基于时间演化连通支配集的双层组网算法 (TCDS, time-evolving connected dominating set algorithm for two-layer network) [21] 和基于双层交换拓扑的分布式集群协同算法 (DCC-TST, distributed cluster cooperation algorithm based on two-layer switching topology) [22] 的网络拓扑性能进行对比。组网算法对比如表 2 所示。

无人机节点被随机分为 2 个业务集群, 节点与节点之间采用 D2D 通信协议, 网络层协议栈为 IPV4, 路由协议为 AODV 协议, 分别对不同场景进行 10 轮蒙特卡罗仿真, 每轮仿真无人机运动 100 s。

图 6 为不同算法同区域不同无人机数量 (无人机密度) 业务集群平均路径时延对比。随着无人机密度增大, 平均路径时延逐渐增加。相比 CEBG, 本文算法在扩大网络规模时, 其平均路径时延性能提升更为明显, 较基准方法降低 15.44%。这是由于双频组网构建的远程直连链路均用来传输业务数据, 且不会出现业务集群间的链路来占用数据链路带宽。而 TCDS 不关注于优化平均路径时延, DCC-TST 以簇形式组网在无人机低密度场景中节点局部可交换信息节点数接近网络节点总数, 算法的业务集群内协调过程近似遍历寻找最优拓扑, 因此表现更加优越。

图 7 为不同算法在无人机数量为 16、城市场景下以不同无人机平均速度业务集群平均路径时延对比。随着无人机平均速度的增加, 网络物理拓扑变化更加频繁, 决策的滞后性导致平均路径时延增加。而本文算法由于构建业务集群内数据链路, 链路稳定性优于单频组网算法, 平均路径时延降低 21.04%。当无人机平均速度低于 5 m/s

表 2

组网算法对比

算法	组网架构	算法简述	计算复杂度
基于临界边的贪心单频组网算法 ^[19]	单层平面式	在每轮迭代时构建效用最大的临界边直至不存在临界边, 目的是优化网络的平均路径时延	$\mathcal{O}(N_{LL}V^5)$, 其中 N_{LL} 为构造临界边数量, V 为无人机总数
基于时间演化连通支配集的双层组网算法 ^[21]	不同类型的两类节点划分为 2 层, 每层均为平面式	考虑网络时域和空域属性, 通过在双层时间演化拓扑图中迭代寻找节点度最大的节点并加入时间演化连通支配集以优化拓扑的连通概率和平均跳数	$\mathcal{O}(T_{\tau}V^2)$, 其中 T_{τ} 表示时空图模型的时隙数, V 为无人机总数
基于双层交换拓扑的分布式集群协同算法 ^[22]	节点划分为多个簇, 上层为簇头之间组网, 下层为簇内节点组网	在保持网络于时间 T 内联合连通性的前提下, 通过集群内协同调节功率按需构建通信链路以最小化平均时延	$\mathcal{O}(IV_{\text{local}}^3)$, 其中 V_{local} 为节点局部可交互节点数, I 为迭代次数

即速度较小时，业务集群结构变化较小，DCC-TST 的迭代次数较少，网络状态感知到决策生成的时间短，决策滞后性较弱，其得到的拓扑结构性能接近最优值略高于本文算法。随着无人机平均速度增加，DCC-TST 的迭代次数较大，计算复杂度 $\mathcal{O}(IV_{\text{local}}^3)$ 大于本文算法 $\mathcal{O}(V_q^2)$ ，决策滞后性显著增加，性能随之降低。

图 8 展示了不同算法在无人机数量为 16、城市场景下以不同节点通信负载（单数据包大小 S_{pak} 不同）的业务集群平均路径时延对比。当节点通信负载较小时，待构建的远程直连链路绝大多数满足业务数据单跳传输要求，因此时延跟单数据包大小 S_{pak} 呈线性正相关；当节点通信负载较大时，很多节点之间无法构建满足单跳传输要求的直连链路，因此时延的增长幅度加大。本文算法只在业务集群内构建链路，链路分布较为均衡受通信负载影响较小，而 DCC-TST 构建链路集中于簇头节点，受节点通信负载影响较大，时延的增长幅度变大更加显著。

图 9 为在无人机数量为 16 时不同算法在不同无人机密度下的平均丢包率对比。实验采用 TCP 传输协议和 16QAM 调制模式。丢包率与构建直连链路质量和网络点到点平均跳数强相关。本文算法选择业务集群内质量较高链路进行构建，在不同无人机密度下丢包率性能整体表现较好。而 DCC-TST 的簇结构在节点数量较少时点到点平均跳数较低（簇内通信大多为一跳或两跳），因此丢包率较低。随着节点数量增加，簇头负载随之增加，簇头到节点的直连链路质量下降，导致丢包率提升幅度增大。

图 10 为无人机数量为 16 时不同算法在不同灾后场景中业务集群平均路径时延对比。考虑郊区、城市和高密度城市场景，其基于载波频率传播参数 C 和场景类型信道参数 D 分别取 $(8.43, 0.58)$ 、 $(11.95, 0.14)$ 和 $(23.22, 0.11)$ [23]。在不同灾后场景中本文算法在优化平均路径时延方面仍展现较好的优越性。对于高密度城市场景，由于 DCC-TST 采用主从簇状结构组建网络，相比平面式拓扑，其构建的通信链路受高层建筑遮挡更严重，因此在时延优化方面弱于本文算法。

图 11 展示了初始无人机数量为 16，平均速度为 5 m/s 情况下的拓扑突变时业务集群平均路径

时延对比。本文算法在每次拓扑突变（无人机入网/离网）之后收敛速度更快，所需构建链路数量更少且收敛后网络性能更优。基于上述分析，在高密度城市场景中，当无人机部署密集且飞行速度较快时，本文算法性能更优，能更好地满足城市应急高动态场景下多无人机协同救援对业务数据传输高效性的需求。

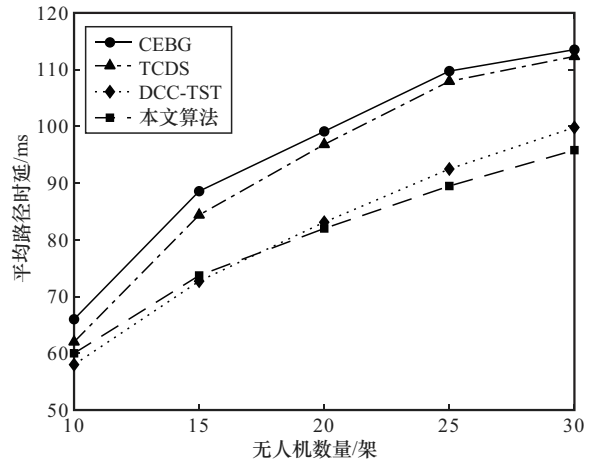


图 6 不同算法同区域不同无人机数量(无人机密度)业务集群平均路径时延对比

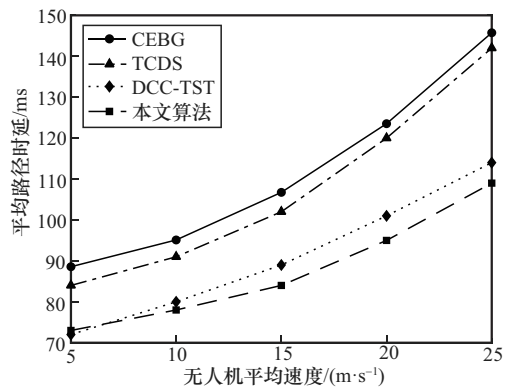


图 7 不同算法不同无人机平均速度业务集群平均路径时延对比

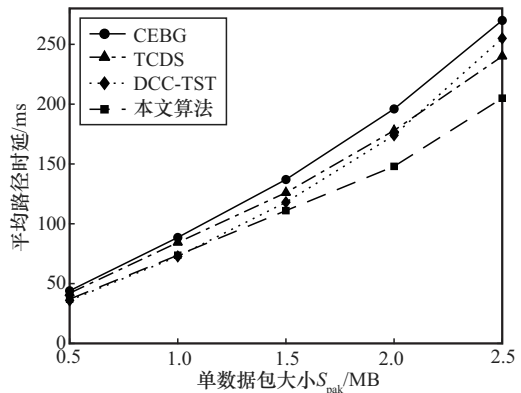


图 8 不同算法在不同通信负载情况下业务集群平均路径时延对比

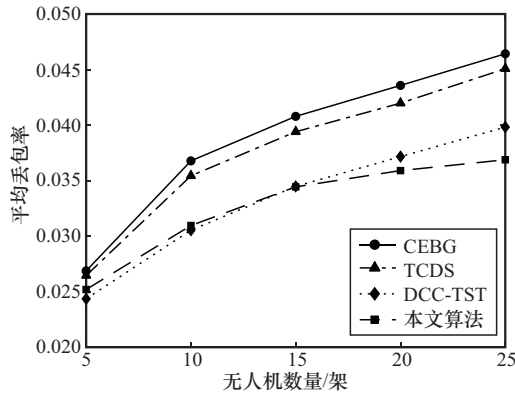


图9 不同算法同区域不同无人机数量(无人机密度)平均丢包率对比

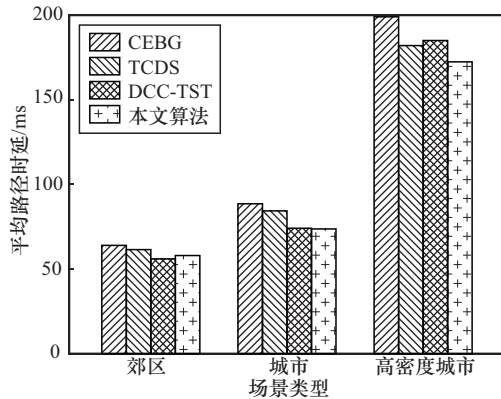


图10 不同算法在不同灾后场景中业务集群平均路径时延对比

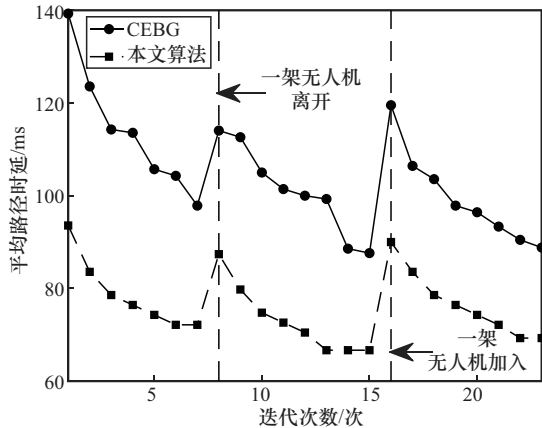


图11 拓扑突变时业务集群平均路径时延对比

4 结束语

本文研究了应急场景下无人机群通信网络组网问题, 考虑到拓扑快变带来的网络连通性频繁失效以及不同类型数据的差异化传输需求, 提出了一种基于控制平面与数据平面分离的无人机群应急动态组网架构, 并设计双频链路分层组网算法实现无人机群控制数据全域流转和业务数据传输的时效性。仿真结果表明, 与传统单频链路组网算法相比, 本

文算法在维持无人机网络拓扑连通性的同时, 有效降低了业务集群内感知数据的端到端平均路径时延。同时, 得益于较低的计算复杂度, 本文算法在面对应急场景中无人机高动态拓扑具有更好的动态适配性。在后续工作中, 将进一步研究分布式无人机在应急场景的非稳态通信环境下通过局部信息预测整体网络拓扑, 并根据不同通信传输指标偏好同时构建控制平面与数据平面的组网算法。

参考文献:

- [1] 王莉, 魏青, 徐连明, 等. 面向通信-导航-感知一体化的应急无人机网络低能耗部署研究[J]. 通信学报, 2022, 43(7): 1-20.
WANG L, WEI Q, XU L M, et al. Research on low-energy-consumption deployment of emergency UAV network for integrated communication-navigating-sensing[J]. Journal on Communications, 2022, 43(7): 1-20.
- [2] TRAN D H, NGUYEN V D, CHATZINOTAS S, et al. UAV relay-assisted emergency communications in IoT networks: resource allocation and trajectory optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(3): 1621-1637.
- [3] WU J, CHEN Q M, JIANG H, et al. Joint power and coverage control of massive UAVs in post-disaster emergency networks: an aggregative game-theoretic learning approach[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(4): 3782-3799.
- [4] IEEE. IEEE standard for flight data transmission of civil unmanned aerial vehicle based on short message mechanisms[S]. 2024.
- [5] ÇABUK U C, TOSUN M, DAGDEVIREN O. MAX-tree: a novel topology formation for maximal area coverage in wireless ad-hoc networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2022, 30(1): 162-175.
- [6] HU S H, LI G H, HUANG G Y. Dynamic spatial-correlation-aware topology control of wireless sensor networks using game theory[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 7093-7102.
- [7] WANG J J, GAO J, SHI W, et al. Cross-layer topology control algorithm based on supermodular game and optimal rigid graph[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(23): 39868-39879.
- [8] FENG Y, WANG F Y, LIU Z X, et al. An online topology control method for multi-agent systems: distributed topology reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2024, 11(5): 4358-4370.
- [9] CHEN J X, WANG Z C. Coordination game theory-based adaptive topology control for hybrid VLC/RF VANET[J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(8): 5312-5324.
- [10] ZHOU R, YANG Y X, SONG D Y, et al. Network topology construction method for UAV swarm systems based on topology duration maximization[C]//Proceedings of the 2023 6th International Conference on Electronics Technology (ICET). Piscataway: IEEE Press, 2023: 551-555.
- [11] WANG B W, SUN Y J, DO-DUY T, et al. Adaptive D-hop connected

dominating set in highly dynamic flying ad-hoc networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2021, 8(3): 2651-2664.

- [12] 王博文, 孙彦景. 基于联盟图博弈的地下空间无人机应急通信网络拓扑控制算法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(3): 996-1005.
WANG B W, SUN Y J. Coalitional graph game based topology control algorithm for unmanned aerial vehicle emergency networks in underground space[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44(3): 996-1005.
- [13] ZHANG C, YAO W, ZUO Y, et al. Multi-objective optimization of dynamic communication network for multi-UAVs system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(3): 4081-4094.
- [14] 曹怡璐, 贾子晔, 尤嘉豪, 等. 基于 SDN 和 NFV 的空天地一体化网络任务部署与恢复综述[J]. 电信科学, 2025, 41(5): 1-16.
CAO Y L, JIA Z Y, YOU J H, et al. A survey of task deployment and recovery in space-air-ground integrated networks based on SDN and NFV[J]. Telecommunications Science, 2025, 41(5): 1-16.
- [15] ZHOU P, FANG X M, WANG X B. Joint radio resource allocation for decoupled control and data planes in densely deployed coordinated WLANs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(6): 3749-3759.
- [16] SUN M Y, XU X D, QIN X Q, et al. AoI-energy-aware UAV-assisted data collection for IoT networks: a deep reinforcement learning method[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(24): 17275-17289.
- [17] GAO J Y, WU Y P, CAIRE G, et al. Unsourced random access in MIMO quasi-static Rayleigh fading channels: finite blocklength and scaling law analyses[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2025, 71(6): 4342-4373.
- [18] KOMALI R S, MACKENZIE A B, GILLES R P. Effect of selfish node behavior on efficient topology design[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(9): 1057-1070.
- [19] ZHAO Y L, LI Y, MAO H L, et al. Social-community-aware long-range link establishment for multihop D2D communication networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(11): 9372-9385.
- [20] PHAM H G. The mixed-integer linear programming for cost-constrained decision trees with multiple condition attributes[C]//Proceedings of the 2022 14th International Conference on Knowledge and Systems Engineering (KSE). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-6.
- [21] LI Y, WANG Y, ZHANG Q Y, et al. TCDS: a time-relevant graph based topology control in triple-layer satellite networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(3): 424-428.
- [22] LU X Q, LAI J G. Distributed cluster cooperation for multiple DC MGs over two-layer switching topologies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4676-4687.
- [23] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.

[作者简介]



胡文信 (2000-), 男, 四川绵阳人, 中国矿业大学博士生, 主要研究方向为复杂场景无人机组网、资源分配。



孙彦景 (1977-), 男, 山东滕州人, 中国矿业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为工业物联网与应急协同。



王博文 (1994-), 男, 山东邹城人, 中国矿业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为无人机应急通信网络、图论、博弈论、匹配理论。



徐鹏 (1984-), 男, 山东威海人, 江苏自动化研究所研究员, 主要研究方向为智能系统集成与应用。



仇鼎 (1998-), 男, 山东泰安人, 中国矿业大学博士生, 主要研究方向为工业抗干扰通信、资源分配。



李庚 (2004-), 男, 安徽宿州人, 中国矿业大学硕士生, 主要研究方向为复杂场景无人机路径规划、资源分配。